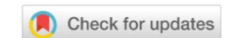
ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 504.064.45
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-7-15

Оригинальное теоретическое исследование

Способ утилизации литий-ионных аккумуляторов с извлечением ценных компонентов



EDN: WMZISP

А.С. Мельникова ✉, **Н.В. Кострюкова**
Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Российская Федерация
✉ annamel7@mail.ru

Аннотация

Введение. В связи с постоянно растущей потребностью в литий-ионных аккумуляторах (ЛИА) и увеличением количества уже используемых накопительных устройств актуальной темой на сегодняшний день является создание экологичного, безопасного и дешевого способа их утилизации. Жизненный цикл литий-ионных аккумуляторов меньше, чем оборудования, где они применяются, поэтому возрастает риск образования большого количества отходов, которые могут привести к серьезным проблемам с утилизацией и пагубному воздействию на окружающую среду. В то же время отработанные литий-ионные аккумуляторы можно использовать вторично, извлекая из них ценные компоненты для возвращения в производственный цикл. В связи с этим целью данной работы является исследование методов утилизации литий-ионных аккумуляторов и анализ предложенного авторами способа их утилизации с извлечением ценных компонентов (Li_2CO_3) при внедрении принципов экономики замкнутого цикла в производство.

Материалы и методы. Авторами использовались методы систематизации научной литературы по проблематике утилизации литий-ионных аккумуляторов. Для выбора наиболее перспективного из них была использована программа Mpr_Dipl. В ней заложены прямые методы принятия решений, метод парных сравнений и метод взвешенной суммы. Разработка технологической схемы процесса переработки ЛИА проводилась в программе «КОМПАС-3D».

Результаты исследования. В результате анализа были выделены достоинства и недостатки каждого метода утилизации литий-ионных аккумуляторов, а также выбран гидрохимический способ с использованием методики решения задач с многокритериальным выбором. Предложена технологическая схема процесса переработки литий-ионных аккумуляторов с извлечением карбоната лития, состоящая из пяти стадий: измельчение, разделение, фильтрация, осаждение и вылавливание влажного осадка Li_2CO_3. Рассчитан материальный баланс разработанного способа утилизации.

Обсуждение и заключение. Разработанная авторами система утилизации обеспечивает безопасную переработку отработавших литий-ионных аккумуляторов при минимальном негативном воздействии на окружающую среду и максимальном выделении ценных компонентов. Результаты исследования могут быть использованы для модернизации процесса утилизации литий-ионных аккумуляторов с целью извлечения дополнительной прибыли от продажи карбоната лития.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, переработка, утилизация, экономика замкнутого цикла, гидрометаллургия

Благодарности. Авторы выражают благодарность наставнику экологического клуба «Зеленый проект» Уфимского университета науки и технологий Эльвире Валериковне Нафиковой за помощь в подготовке исследования, а также редакции журнала и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, устранение которых позволило повысить ее качество.

Для цитирования. Мельникова А.С., Кострюкова Н.В. Способ утилизации литий-ионных аккумуляторов с извлечением ценных компонентов. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(4):7–15. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-7-15

Original Theoretical Research

Method for Recycling Lithium-Ion Batteries with the Extraction of Valuable Components

Anna S. Melnikova✉, **Natalya V. Kostryukova**
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation
✉ annamel7@mail.ru

Abstract
Introduction. Due to the increasing demand for lithium-ion batteries, it has become a pressing issue to find an environmentally friendly and safe way to dispose of old batteries. The life cycle of these batteries is shorter than that of the equipment they power, which leads to a growing amount of waste. This waste poses a serious problem for disposal and can have harmful effects on the environment. At the same time, recycling spent lithium-ion batteries offers a solution. By extracting valuable components we can return these components to the production process and create a closed-loop system. In this regard, the aim of this study is to investigate the methods of recycling lithium-ion batteries and to analyze the proposed method for their disposal, which involves extracting valuable components such as Li2CO3, while introducing the principles of a closed-loop economy into the production process.
Materials and Methods. The methods of systematizing scientific literature on lithium-ion battery recycling were used. The “Mpr_Dipl” software was used to select the most promising method, which includes direct decision-making, paired comparison, and weighted sum methods. A technological process for lithium-ion batteries processing was developed using the COMPASS-3D software.
Results. As a result of the analysis, the advantages and disadvantages of each lithium-ion recycling method were highlighted. A hydrochemical method was selected using the multi-criteria decision-making method. A five-stage process for lithium ion battery processing with lithium carbonate extraction was developed, including grinding, separation, filtration, precipitation, and wet Li2CO3 capture. The material balance for the developed method was calculated.
Discussion and Conclusion. The developed recycling system ensures safe recycling of used lithium-ion batteries with minimal negative environmental impact and maximum recovery of valuable components. These results can be used to optimize the recycling process and maximize the extraction of valuable materials from spent lithium-ion batteries for further sale as lithium carbonate, thereby generating additional revenue.

Keywords: lithium-ion battery, recycling, disposal, circular economy, hydrometallurgy

Acknowledgements. The authors would like to thank Elvira Valerikovna Nafikova, the mentor of the "Green Project" environmental club at Ufa University of Science and Technology, for her assistance in preparing this paper. They also extend their gratitude to the Editorial team and reviewers for their attention and valuable recommendations, which made it possible to improve the quality of the paper.

For citation. Melnikova AS, Kostryukova NV. Method for Recycling Lithium-Ion Batteries with the Extraction of Valuable Components. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(4):7–15. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-7-15

Введение. Ежегодно растут объемы мирового потребления энергии в результате технического прогресса, увеличения численности населения и развития экономики. Сейчас ученые проводят исследования, направленные на разработку и эффективное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как энергии ветра, солнца, воды и приливов [1]. Однако большинство возобновляемых источников энергии нельзя использовать регулярно, поэтому необходимо иметь накопительные устройства для обеспечения постоянного поступления энергии из таких источников [2]. Именно для этого и применяют литий-ионные аккумуляторы. Ежегодно спрос на них растет и в ближайшем будущем продолжит расти, так как появляются новые материалы и совершенствуются процессы производства. О росте спроса на ЛИА свидетельствуют оценки экспертов: согласно прогнозам Fortune business insight, объем рынка литий-ионных аккумуляторов к 2028 году достигнет 193 миллиардов долларов (рис. 1).

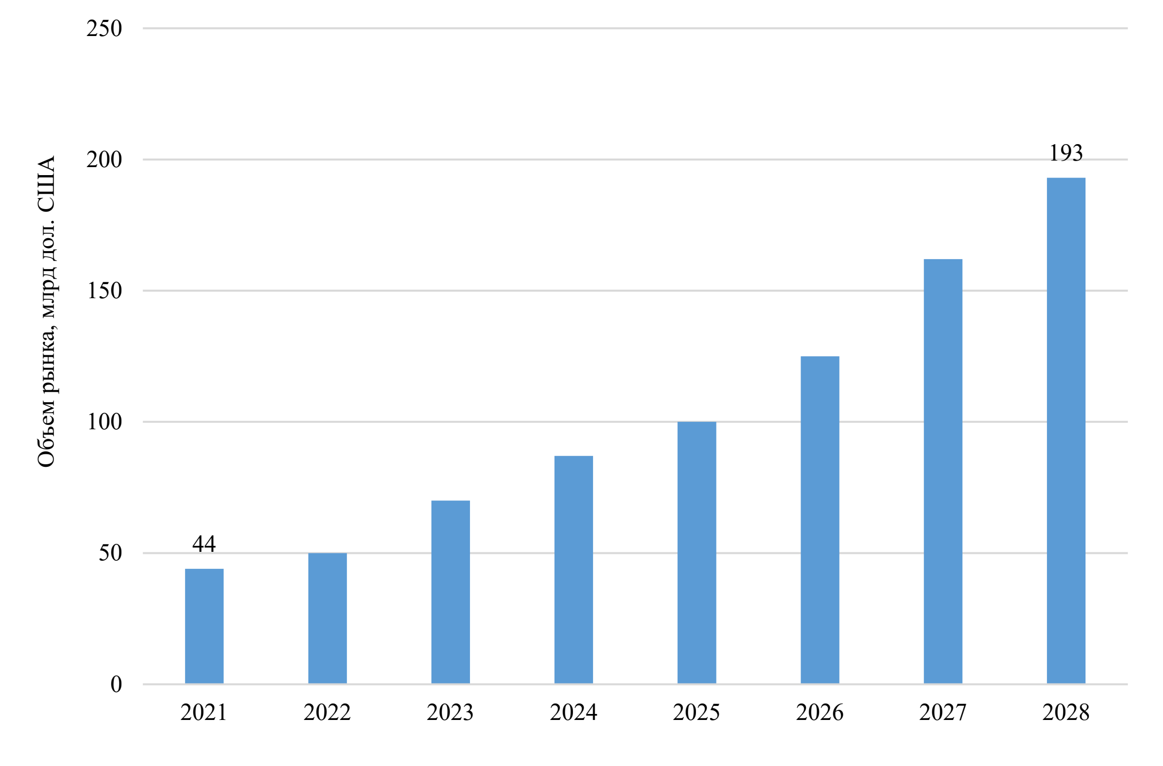


Рис. 1. Объем и прогноз динамики мирового рынка литий-ионных аккумуляторов, млрд дол. США

На сегодняшний день в России действует несколько заводов по производству ЛИА. К крупнейшим из них можно отнести:

– Aspil Energy (Пятигорск);

– «Сатурн» (Красноярск);

– «Уралэлемент» (Челябинск);

– ОАО «НИАИ «Источник» (Санкт-Петербург).

Тут важно отметить, что комплектующие детали для аккумуляторов импортируются из Китая и Боливии [3].

В связи с активным использованием ЛИА актуальность приобретает создание экологичного, безопасного и дешевого способа утилизации отработанных аккумуляторов. Авторы работы [4] считают, что около 95 % всех литий-ионных аккумуляторов, созданных в мире, остаются непереработанными в домашних хозяйствах. Это способствует образованию большого количества отходов и увеличению материальных затрат на их утилизацию [5]. Таким образом, для выхода из сложившейся ситуации необходимо внедрение практик экономики замкнутого цикла и утилизации ЛИА с извлечением из них ценных материалов [6]. Целью данной работы является исследование методов утилизации литий-ионных аккумуляторов и разработка системы утилизации ЛИА с извлечением ценных компонентов (карбоната лития), используемой в условиях экономики замкнутого цикла.

Материалы и методы. Проведён анализ методов утилизации литий-ионных аккумуляторов. Основой для него послужили отечественные и зарубежные исследования. Для выбора наиболее перспективного метода была применена методика решения задач с многокритериальным выбором с применением программного обеспечения Mpr_Dipl.

Расчет материального баланса системы производился на основании [7].

Разработка технологической схемы осуществлялась с использованием программы «КОМПАС-3D».

Результаты исследования

1. Анализ существующих методов переработки ЛИА. Методы вторичной переработки являются потенциальным решением для возобновления использования литий-ионных аккумуляторов в экономическом цикле [8]. Это важная часть экономики замкнутого цикла, поскольку она позволяет осуществлять внутреннее перемещение материалов, что снижает потребление ресурсов, связанных с производством первичного сырья [9].

Переработка ЛИА важна, поскольку она снижает воздействие на окружающую среду при добыче новых ресурсов и утилизации опасных отходов. Это также позволяет экономить ресурсы и снижать затраты на производство новых аккумуляторов.

На рис. 2 представлены три наиболее распространённых метода утилизации и переработки литий-ионных батарей/аккумуляторов: физический, пирометаллургический и гидрохимический [10].

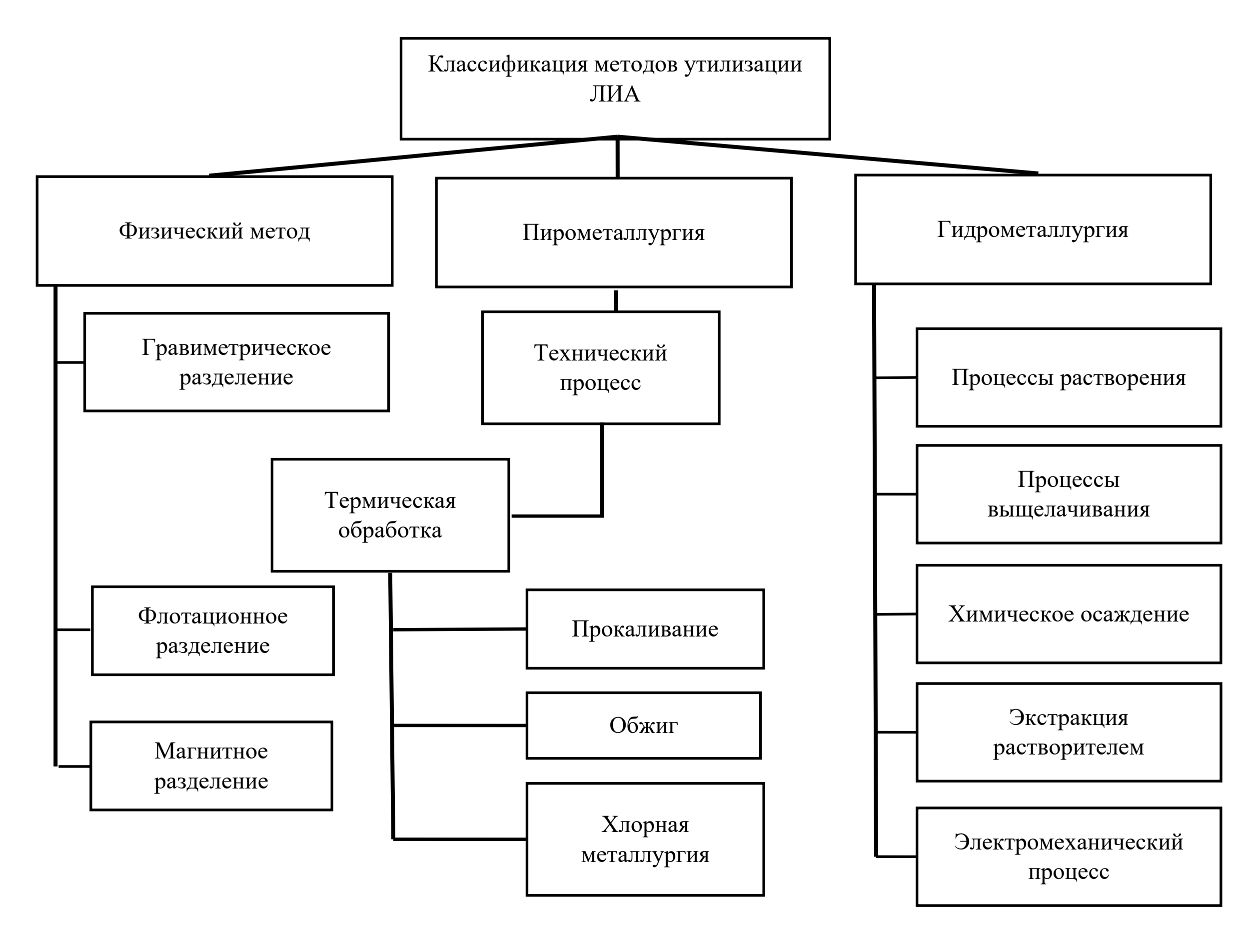


Рис. 2. Классификация методов утилизации ЛИА

Суть физического метод заключается в разборке аккумуляторов с использованием различных способов для разделения компонентов батареи в соответствии с их физическими свойствами, такими как плотность и магнетизм. Основными способами физического метода являются гравиметрическое, флотационное и магнитное разделение. Этот метод является одним из самых популярных методов утилизации литий-ионных батарей благодаря малым затратам и экологичности. Однако следует отметить, что физические методы переработки могут быть менее эффективными при извлечении ценных компонентов, чем другие методы.

Пирометаллургия — это хорошо известный и надежный метод, который заключается в обработке материалов при высоких температурах, он позволяет извлекать из отходов аккумуляторных батарей большое количество ценных металлов, таких как кобальт и никель. Этот процесс потребляет много энергии, но, как правило, он надежен и не требует специальной настройки для обработки отходов с определенным составом, что выгодно для материалов с переменным составом, таких как электронные отходы и батарейный мусор [11].

Процесс пирометаллургии состоит из трех этапов: восстановление металла, пиролиз и сжигание газа. Пиролиз включает в себя термическую деградацию органических компонентов литий-ионных аккумуляторов. В результате пиролиза образуются токсичные дымовые газы, которые могут быть вредны для технологического процесса [12]. Основными коммерческими компаниями, занимающимися пирометаллургической переработкой литий-ионных аккумуляторов, являются Sumitomo-Sony в Японии и Umicore AG & Co. KG в Бельгии [13].

Суть гидрометаллургического процесса заключается в использовании водных растворов для извлечения необходимых металлов из катодного материала [14]. В гидрометаллургическом процессе скорость извлечения металла высока при меньших затратах энергии и отсутствии токсичных выбросов в атмосферу. Суть процесса заключается в том, что измельченный материал обрабатывают кислотой или щелочью для растворения металлов. Затем полученный раствор очищают и извлекают металлы. Из-за сложной конструкции ячеек начальной стадией является измельчение, далее следуют фазы выщелачивания и механического разделения, которые включают в себя ферромагнетизм. Отделение углерода от оксида металла также может быть осуществлено методом пенной флотации [15].

Основными преимуществами гидрометаллургии являются использование недорогих реагентов, слабое воздействие на окружающую среду, низкие эксплуатационные расходы, безопасность труда и возможность промышленного масштабирования.

2. Выбор наиболее эффективного метода утилизации ЛИА. Для выбора наиболее перспективной и логически обоснованной технологии утилизации литий-ионных аккумуляторов с помощью специальной программы разработана задача с многокритериальным выбором и найдено решение, удовлетворяющее наиболее важным требованиям эффективной утилизации.

Для решения данной задачи нужны входные данные — альтернативы (в данном случае это сами методы утилизации). Критерии оценивания проранжированы по шкале от 1 до 5 («Возможность интегрирования в процесс производства», «Трудо/энергоемкость процесса», «Уровень восстановления материалов», «Безопасность процесса», «Образование побочных продуктов»), где 1 будет считаться как наиболее благоприятный исход, а 5 — наименее благоприятный.

Основной критерий выбора для данной задачи — «Возможность интегрирования в процесс производства», так как основополагающим решением будет являться использование ресурсов основной производственной линии. Другим критериям будут присвоены следующие весовые коэффициенты:

«Возможность интегрирования в процесс производства» — 0,4;

«Трудо/энергоемкость процесса» — 0,15;

«Уровень восстановления материалов» — 0,2;

«Безопасность процесса» — 0,1;

«Образование побочных продуктов» — 0,15.

Данные ранжирования критериев по всем трем методам утилизации представлены в таблице 1.

Таблица 1

Данные для задачи многокритериального выбора

Критерии	Способ переработки		
	физический	пирометаллургический	гидрометаллургический
Трудо/энергоемкость процесса	2	3	4
Возможность интегрирования в процесс производства	3	5	2
Уровень восстановления материалов	4	5	2
Безопасность процесса	4	2	3
Образование побочных продуктов	2	5	3

Для определения наиболее подходящего выбора авторы воспользовались программой Mpr_Dipl. В ней заложены методы принятия решений в многокритериальных задачах: прямые методы (отличаются характерной зависимостью полезности альтернативы от ее оценок по некоторым специальным критериям), методы парных сравнений (критерии упорядочиваются по важности, после чего считается лучшим тот, который имеет более высокую оценку по более важному критерию вне зависимости от оценок по прочим критериям.), метод взвешенной суммы (методы принятия решения в условиях определенности и в условиях неопределенности). Эту программу использовали авторы статьи [16] для выбора метода утилизации лузги подсолнечника. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

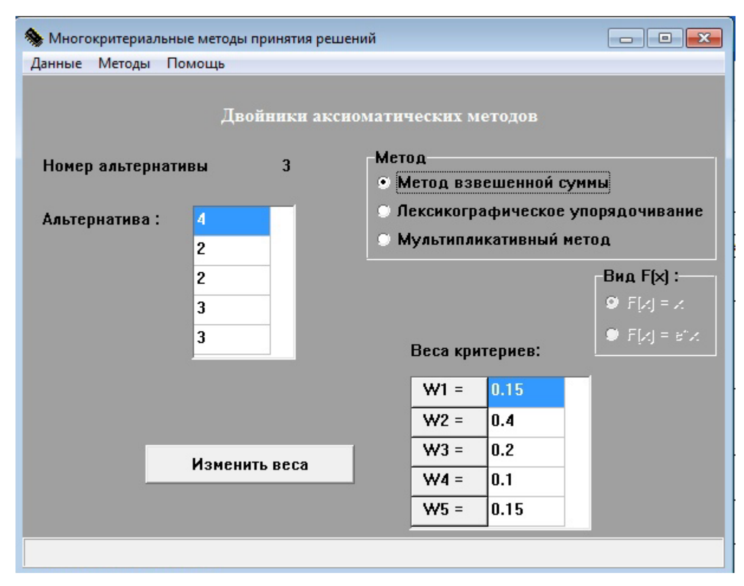


Рис. 3. Результаты расчетов программы «Mpr_Dipl»

Таким образом, наиболее подходящим методом утилизации литий-ионных аккумуляторов в рассматриваемом случае является гидрохимический метод (альтернатива № 3).

3. Технология переработки отработанных ЛИА с использованием гидрохимического способа. По результатам анализа различных технологий переработки литий-ионных аккумуляторов было принято решение использовать гидрохимический способ с извлечением карбоната лития, состоящий из нескольких этапов. Карбонат лития является ценным продуктом и широко применяется в металлургии, его используют для десульфации стали. Также он находит применение в пиротехнике, производстве стекол и пластмасс, электроизоляционного фарфора, ситаллов, а также в сельском хозяйстве в качестве удобрения и кормовой добавки. Технологическая схема процесса переработки ЛИА представлена на рис. 4.

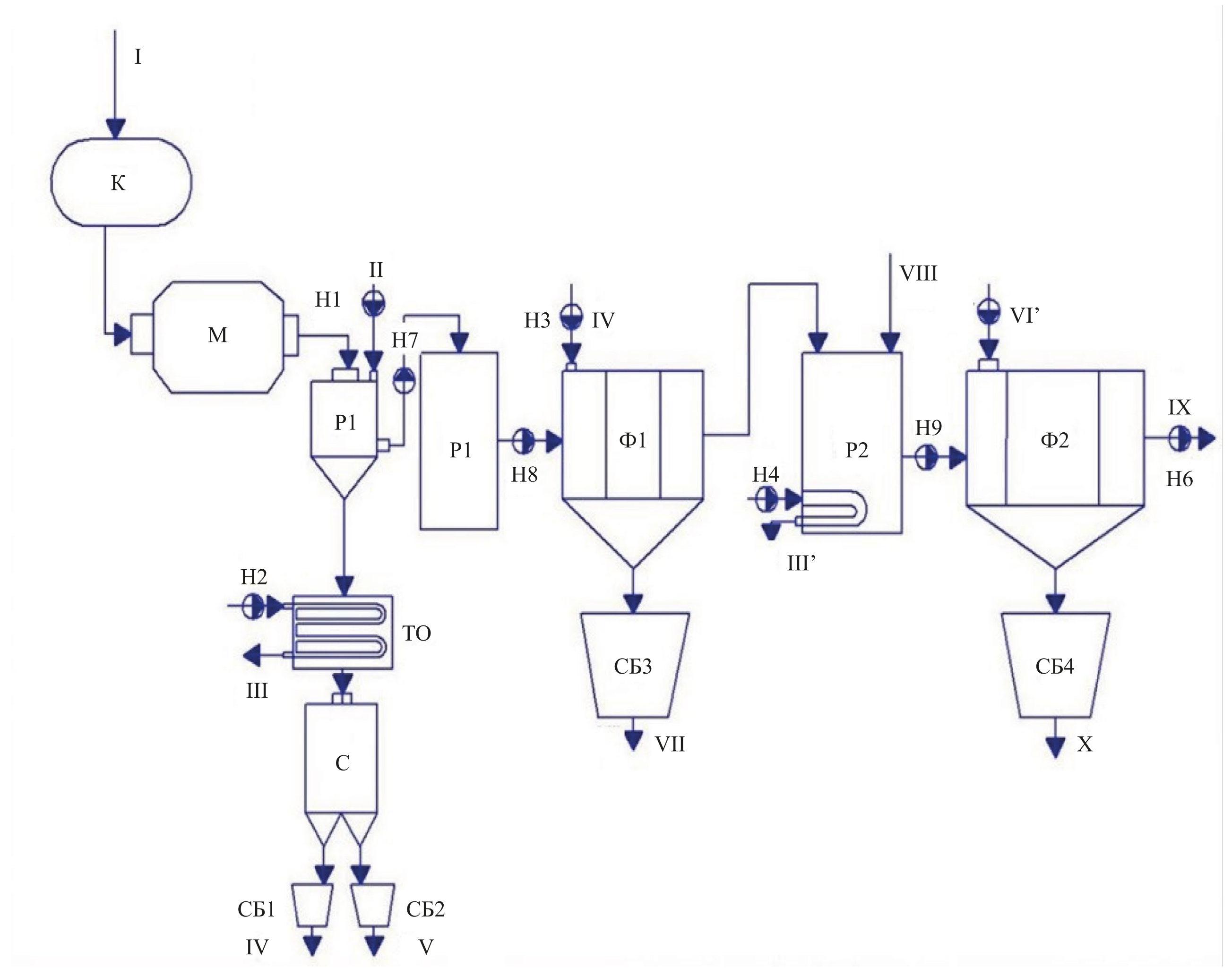


Рис. 4. Технологическая схема процесса переработки ЛИА:
I — отработанный ЛИА; II — вода; III, III' — теплоноситель; IV — уловленный пластик; V — уловленные металлы;
VI, VI' — вода для промывки пресс-фильтра; VII — уловленные оксиды металлов, графит;
VIII — Na_2CO_3; IX — фильтр ля очистки воды; X — Li_2CO_3

Согласно данным, приведенным на рис. 4, технологическая схема процесса переработки ЛИА с извлечением карбоната лития состоит из пяти стадий: измельчение, разделение, фильтрация, осаждение и вылавливание влажного осадка Li_2CO_3. На первом этапе используемым оборудованием являются криокамера, шаровая мельница, вертикальная молотковая дробилка, теплообменник и циркуляционный насос. На втором этапе используется электростатический сепаратор для разделения металлических частиц и пластика. На третьем этапе основное оборудование — это суспензионный насос и пресс-фильтр. Они необходимы для улавливания диоксида марганца, графита, остатка металлических частиц и пластика. Для осаждения Li_2CO_3 применяется реакционная емкость.

Авторами был произведен расчет материального баланса разработанного ими способа (таблица 2). Расчет делался из прогноза, что в сутки на производстве будет перерабатываться тонна ЛИА с заданными характеристиками.

Таблица 2

Сводный материальный баланс процесса переработки

Приход			
Продукты переработки	т/сут.	т/год	% масс
1. Отходы в виде литий-ионных аккумуляторов, в т.ч.	1,000	25,000	67,980
диоксид марганца	0,150	3,750	
графит	0,060	1,500	
соединения лития	0,110	2,750	
растворители	0,180	4,500	
металлические частицы	0,350	8,750	
пластик	0,150	3,750	
2. Вода	0,403	10,075	27,396
3. Na_2CO_3	0,068	1,700	4,624
Итого	1,471	36,775	100,000
Расход			
Продукты переработки	т/сут.	т/год	% масс
1. Влажный осадок Li_2CO_3	0,081	2,025	5,506
2. Фильтрат	0,627	15,675	42,868
3. Осадок (на пресс-фильтре 1)	0,254	6,350	17,267
4. Металлические частицы	0,349	8,725	23,725
5. Пластик	0,149	3,725	6,962
6. Водяной пар, выделенный в процессе сушки осадка	0,011	2,750	3,672
Итого	1,471	36,775	100,000

В результате внедрения технологии переработки ЛИА из 25 тонн отходов в год будет выделено 2,025 тонны влажного осадка Li_2CO_3, 6,350 тонны осадка в виде графита, диоксида марганца, металлических частиц и пластика, на первичной стадии уловлено и разделено 8,725 тонны металлических частиц, 3,725 тонны пластика. Образовавшийся фильтрат (15,675 тонны за год) предложено отправить на водоподготовительную установку основного производства завода по производству литий-ионных аккумуляторов N, где происходит многоуровневая очистка воды.

Обсуждение и заключение. В ходе исследования были проанализированы различные способы утилизации литий-ионных аккумуляторов, выявлены их достоинства и недостатки. Произведен поиск наиболее перспективного метода утилизации ЛИА с использованием задачи с многокритериальным выбором. Представлен способ утилизации литий-ионных аккумуляторов с извлечением ценных компонентов с применением гидрохимического метода. Данная система обеспечивает безопасную переработку отработанных литий-ионных аккумуляторов с минимальным негативным влиянием на окружающую среду и максимальным выделением ценных компонентов.

Таким образом, внедрение экономики замкнутого цикла в процесс переработки ЛИА может снизить негативное воздействие на окружающую среду, а также принести финансовые выгоды при извлечении из них ценных компонентов. Вторичная переработка станет важными факторами снижения объемов образования отходов и рационального использования энергии.

Список литературы / References

1. Bin Huang, Zhefei Pan, Xiangyu Su, Liang An. Recycling of Lithium-Ion Batteries: Recent Advances and Perspectives. *Journal of Power Sources*. 2018;399:274–286. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.116

2. Yue Yang, Emenike G Okonkwo, Guoyong Huang, Shengming Xu, Wei Sun, Yinghe He. On the Sustainability of Lithium-Ion Battery Industry — A Review and Perspective. *Energy Storage Mater*. 2021;36:186–212. https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.12.019

3. Аренков И.А., Иванова Д.В., Жеребчикова П.Е. Аналитический обзор рынка производителей литий-ионных аккумуляторов. *Экономика, предпринимательство и право*. 2023;13(12):5963–5980. https://doi.org/10.18334/epp.13.12.119994

Arenkov IA, Ivanova DV, Zherebchikova PE. Analytical Review of the Market for Lithium-Ion Battery Manufacturers. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law.* 2023;13(12):5963–5980. (In Russ.) https://doi.org/10.18334/epp.13.12.119994

4. Jędrzej Piątek, Semih Afyon, Tetyana M Budnyak, Serhiy Budnyk, Sipponen MH, Adam Slabon. Sustainable Li-Ion Batteries: Chemistry and Recycling. *Advanced Energy Materials*. 2021;11(43):203456. https://doi.org/10.1002/aenm.202003456

5. Hayder Ali, Hassan A Khan, Pecht MG. Circular Economy of Li Batteries: Technologies and Trends. *Journal of Energy Storage*. 2021;40:102690. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102690

6. Fisher M, Apt J, Whitacre JF. Can Flow Batteries Scale in the Behind-the-Meter Commercial and Industrial Market? A Techno-Economic Comparison of Storage Technologies in California. *Journal of Power Sources*. 2019;420:1–8. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.02.051

7. Бесков В.С. *Общая химическая технология*. Москва: ИКЦ «Академкнига»; 2006. 452 с. URL: https://library.tou.edu.kz/fulltext/buuk/b2381.pdf (дата обращения: 20.06.2024).

Beskov VS. *General Chemical Technology*. Moscow: IKTs Akademkniga; 2006. 452 p. URL: https://library.tou.edu.kz/fulltext/buuk/b2381.pdf (In Russ.) (accessed: 20.06.2024).

8. Velazquez-Martínez O, Valio J, Santasalo-Aarnio A, Reuter M, Serna-Guerrero R, Serna-Guerrero R. A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. *Batteries*. 2019;5(4):68. https://doi.org/10.3390/batteries5040068

9. Jinqiu Xu, Thomas HR, Francis RW, Lum KR, Jingwei Wang, Bo Liang. A Review of Processes and Technologies for the Recycling of Lithium-Ion Secondary Batteries. *Journal of Power Sources*. 2008;177(2):512–527. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.074

10. Мельникова А.С. Способы утилизации литий-ионных источников тока. В: Труды международной научной экологической конференции «Аграрные ландшафты, их устойчивость и особенности развития», Краснодар, 24–26 марта 2020 года. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 2020. С. 202–204.

Melnikova AS. Methods for Disposal of Lithium-Ion Current Stones. In: *Proceedings of the International Scientific Ecological Conference "Agricultural Landscapes, Their Sustainability and Development Features"*, Krasnodar, March 24–26, 2020.Krasnodar: Kuban State Agrarian University; 2020. P. 202–204. (In Russ.)

11. Xuehu Zhong, Wei Liu, Junwei Han, Fen Jiao, Wenqing Qin, Tong Liu, et al. Pyrolysis and Physical Separation for the Recovery of Spent LiFePO4 Batteries. *Waste Management*. 2019;89:83–93. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.068

12. Thompson DL, Hartley JM, Lambert SM, Shiref M, Harper GDJ, Kendrick E, et al. The Importance of Design in Lithium-Ion Battery Recycling – A Critical Review. *Green Chemistry*. 2020;22:7585–7603. https://doi.org/10.1039/D0GC02745F

13. Ekberg C, Petranikova M. Chapter 7 – Lithium Batteries Recycling. In book: Chagnes A, Światowska J (eds.). *Lithium Process Chemistry*. 2015. P. 233–267. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801417-2.00007-4

14. Juntao Hu, Jialiang Zhang, Hongxu Li, Yongqiang Chen, Chengyan Wang. A Promising Approach for the Recovery of High Value-Added Metals from Spent Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*. 2017;351:192–199. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.093

15. Pagliaro M, Meneguzzo F. Lithium Battery Reusing and Recycling: A Circular Economy Insight. *Helliyon*. 2019;5(6):e01866. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01866

16. Ишбулатова А.И., Кусова И.В. Гранулирование как способ утилизации лузги подсолнечника. В: *Труды IV международной научно-практической конференции «Проблемы обеспечения безопасности» (БЕЗОПАСНОСТЬ-2022), посвященной 90-летию УГАТУ*. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет; 2022. С. 252–255.

Ishbulatova AI, Kusova IV. Granulation as a Way to Recycle Sunflower Husks. In: *Proceedings of the IV International Scientific and practical conference "Security Problems" (SECURITY-2022) dedicated to the 90th anniversary of USATU*. Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2022. P. 252–255. (In Russ.)

Об авторах:

Анна Сергеевна Мельникова, аспирант кафедры безопасности производства и промышленной экологии Уфимского университета науки и технологий (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32), SPIN-код, ORCID, ScopusID, annamel7@mail.ru

Наталья Викторовна Кострюкова, кандидат химических наук, доцент кафедры безопасности производства и промышленной экологии Уфимского университета науки и технологий (450076, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32), SPIN-код, ScopusID, kostrukova@list.ru

Заявленный вклад авторов:

А.С. Мельникова: анализ литературных данных, описание теоретической части исследования, расчет материального баланса, оформление научной статьи.

Н.В. Кострюкова: создание технологической схемы процесса переработки ЛИА.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Anna S. Melnikova, Postgraduate Student of the Industrial Safety and Industrial Ecology Department, Ufa University of Science and Technology (32, Zaki Validi Str., Ufa, 450076, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, annamel7@mail.ru

Natalya V. Kostryukova, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Industrial Safety and Industrial Ecology Department, Ufa University of Science and Technology (32, Zaki Validi Str., Ufa, 450076, Russian Federation), SPIN-code, ScopusID, kostrukova@list.ru

Claimed Contributorship:

FS Melnikova: analysis of literary data, description of the theoretical part of the research, calculation of material balance, design of a scientific article.

NV Kostryukova: creation of a technological scheme of LIB processing process.

Conflict of Interest Statement: **the authors do not have any conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / **Received** 05.09.2024
Поступила после рецензирования / **Revised** 24.09.2024
Принята к публикации / **Accepted** 08.10.2024